

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

引用本文:

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2762-2770.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响

范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143-2150 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187>

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103-2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

铅冶炼污染石灰性土壤上冬小麦间作伴矿景天的探讨

卢一富, 李真理, 阮心玲, 李会勇, 张红毅, 田会阳, 李立平

农业环境科学学报. 2015(9): 1686-1692 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.009>

不同浓度及不同来源纳米银对伴矿景天生长及重金属吸收的影响研究

王朝阳, 马婷婷, 周通, 李柱, 吴龙华, 周守标, 骆永明

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 250-256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1039>

丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响

王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 李丹, 王贤波, 张奇春

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2292-2298 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0825>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2762–2770.

DENG Yue-qiang, CAO Xue-ying, TAN Chang-yin, et al. Effect of organic materials on phytoremediation efficiency of Cd-contaminated acid soil by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2762–2770.



开放科学 OSID

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强¹, 曹雪莹², 谭长银^{1*}, 孙丽娟¹, 蔡润众¹, 彭曦¹, 柏佳¹, 黄硕霈¹, 周青¹

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南师范大学环境重金属污染机理及生态修复重点实验室, 长沙 410081; 2. 长沙学院乡村振兴研究院, 长沙 410022)

摘要:伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是一种镉/锌(Cd/Zn)超积累植物,是Cd污染土壤吸取修复的理想植物。为提高伴矿景天(*S. plumbizincicola*)对Cd污染酸性土壤的修复效果,本研究以水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪和水溶性有机肥4种有机物料为材料,分别按土质量1%、3%的施用量施入Cd污染酸性农田土壤,研究了4种有机物料对伴矿景天Cd修复效率的影响。结果表明:施用有机物料可提高土壤pH值和土壤有机质、碱解N、有效P和速效K含量,有效改善供试土壤理化性质;有机物料对土壤有效态Cd含量的影响因有机物料种类和施用量而异,以3%水溶性有机肥处理效果最好,较对照提高了50.0%。与对照相比,施用有机物料显著促进了伴矿景天生长,地上部和根部生物量分别增加了1.08%~40.69%和4.17%~54.17%;水稻秸秆、大豆秸秆和水溶性有机肥处理伴矿景天地上部和根部Cd含量分别较对照增加了10.02%~64.91%和10.95%~45.78%。单一种植伴矿景天修复后土壤Cd去除率为27.6%;施用有机物料辅助修复,土壤Cd去除率可达29.8%~50.7%。因此,在Cd污染酸性土壤伴矿景天(*S. plumbizincicola*)修复中,可考虑水稻秸秆还田和施用水溶性有机肥来提升修复效率。

关键词:有机物料;伴矿景天;植物修复;Cd污染土壤;Cd有效性

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)12-2762-09 doi:10.11654/jaes.2020-0605

Effect of organic materials on phytoremediation efficiency of Cd-contaminated acid soil by *Sedum plumbizincicola*

DENG Yue-qiang¹, CAO Xue-ying², TAN Chang-yin^{1*}, SUN Li-juan¹, CAI Run-zhong¹, PENG Xi¹, BAI Jia¹, HUANG Shuo-pei¹, ZHOU Qing¹

(1. Key Laboratory of Environmental Heavy Metal Pollution Mechanism and Ecology Remediation, College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Rural Vitalization Research Institute, Changsha University, Changsha 410022, China)

Abstract: *Sedum plumbizincicola* is a native cadmium/zinc (Cd/Zn) hyperaccumulator, and it is an effective plant for the phytoextraction of Cd-contaminated soil. To improve phytoremediation of Cd-contaminated acid soil by *S. plumbizincicola*, a pot experiment was conducted to investigate the effects of four organic materials [rice straw (RS), soybean straw (SS), pig manure (PM), and dissolved organic fertilizer (OF), and their application of 1% and 3% of soil] on the phytoremediation efficiency of *S. plumbizincicola*. The results showed that the application of organic materials could improve the physicochemical properties of tested soil. Soil pH, organic matter, as well as available N, P, and K content, under the organic materials application treatment were higher than those of the control (CK). The effect of organic materials on soil available Cd was different due to the different kinds of organic materials and application rates, and 3% OF treatment

收稿日期:2020-05-29 录用日期:2020-07-29

作者简介:邓月强(1995—),男,湖南怀化人,硕士研究生,从事土壤环境与农产品安全研究。E-mail:yueqiangdeng@163.com

*通信作者:谭长银 E-mail:chytan@hunnu.edu.cn

基金项目:湖南省科技计划重点项目(2017NK2141);湖南省国内一流培育学科建设项目(5010002);湖南省研究生科研创新项目(CX20200525)

Project supported: The Key Research and Technology Project of Hunan Province(2017NK2141); The Construction Program for First-Class Disciplines of Hunan Province, China(5010002); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate, China(CX20200525)

increased the soil available Cd by 50.0% compared with the CK. The application of organic materials promoted the growth of *S. plumbizincicola*: shoot and root biomass, increased by 1.08%~40.69% and 4.17%~54.17%, respectively, compared with the CK. The treatments of adding RS, SS, and OF improved Cd concentration in *S. plumbizincicola* shoots and roots by 10.02%~64.91% and 10.95%~45.78%, respectively. Under the planting conditions of *S. plumbizincicola*, the soil Cd removal rate reached by CK was 27.6%, while that reached by organic material treatments was 29.8%~50.7%. Results of the present study imply that the rice straw returning and application of dissolved OF could be used as an auxiliary strengthening measure in the phytoextraction of Cd-contaminated acid soil by *S. plumbizincicola*.

Keywords: organic material; *Sedum plumbizincicola*; phytoremediation; Cd-contaminated soil; Cd availability

镉(Cd)是一种对人体有害的重金属元素,因其生物活性高,毒性强,可以通过食物链对人体健康构成严重威胁^[1-3]。近年来,我国农田土壤Cd污染及其引起的稻米Cd污染问题受到人们越来越多的关注。据《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤Cd的点位超标率达7%,受Cd污染农田面积约为 2×10^5 km²,Cd已成为我国农田重金属污染元素之首^[4-5]。相对于物理和化学修复技术,植物修复(Phytoremediation)被认为是环保、低成本且不破坏土壤原有结构的重金属污染土壤的修复方法^[6]。但植物修复技术在学习过程中也存在一些明显不足,如土壤Cd有效性低,部分超积累植物生长速度慢、生物量小、修复周期长等^[7],这些因素制约着植物修复效率。因此,如何提高超积累植物的Cd污染土壤修复效率已成为当前土壤修复领域的研究热点。

伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是一种Cd/Zn超积累植物^[8-9],在Cd污染土壤植物修复中已得到广泛应用。已有研究表明,农艺措施、生物措施等是提高伴矿景天修复效率的重要途径^[10]。适宜的种植密度、水分条件、光照条件等有利于伴矿景天的生长,可提高伴矿景天生物量^[11-13]。沈丽波等^[14]发现,增施氮肥是伴矿景天地上部生物量增加的主要原因,而钾肥是增加伴矿景天地上部Cd含量的主要因素。马文亭等^[15]研究表明,里氏木霉FS10-C可通过增加伴矿景天生物量来提高其修复效率,土壤Cd去除率最高可达41.25%。此外,有机酸在强化伴矿景天修复方面也有明显效果^[16]。

秸秆还田和施用有机肥是提升农田土壤有机质含量、改善土壤肥力的重要措施,明确其对土壤Cd有效性和植物Cd吸收积累的影响,对Cd污染农田土壤的植物修复具有重要的指导意义。水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪等是常见的农业废弃物,廉价易得,如果对其加以利用,既可以改良土壤、提高土壤肥力和降低成本,还可以用于污染土壤修复,是一种可兼顾修复和

培肥的可行方法^[17-18]。近年来,对施用有机物料改善土壤质量和提高作物产量等方面的研究已取得重要进展,但有机物料对土壤(特别是酸性土壤)中Cd有效性的影响尚待进一步明确。有机物料通过改变Cd的生物有效性来影响植物对Cd的吸收,有研究表明,在重金属污染农田土壤上,施用秸秆有机物料提高了土壤pH值,降低了土壤Cd的生物有效性,减少了黑麦草对土壤Cd的吸收和积累^[19]。但也有研究发现,有机物料施入土壤后,不仅可以提高土壤肥力、改良土壤结构,而且在矿化分解过程中释放出可溶性有机质(DOM)活化土壤Cd,促进植物对Cd的吸收^[20-21]。这种结果的差异可能与污染土壤类型、植物种类、有机物料的组成、性质差异和用量等密切相关。因此,利用有机物料辅助超积累植物修复Cd污染土壤有待进一步探索和研究。

本研究以湖南省湘潭县典型Cd污染酸性农田土壤为研究对象,探讨添加水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪和水溶性有机肥4种有机物料对伴矿景天修复Cd污染酸性农田土壤的效果和潜力,筛选可强化伴矿景天高效修复Cd污染土壤的有机物料,以期为Cd污染酸性农田土壤修复中有机物料的合理施用及伴矿景天高效修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*),植株采自湖南省湘潭县某育苗基地(27°44'4.9"N, 112°56'22.3"E)。供试土壤采自湖南省湘潭县某重金属修复试验基地污染农田(27°44'5.2"N, 112°56'25.8"E),由于长期工业发展,区域内土壤重金属污染严重。该区域属于典型的亚热带季风性湿润气候,雨热同季,年均温16.7~18.3℃,年平均降水量1300mm,以双季稻种植为主。土壤类型为第四纪红色黏土发育的水稻土(红黄泥),取表层土壤(0~20cm),经风干

去除杂物后混匀,过10目尼龙筛备用。土壤基本理化性质如下:pH 4.73,有机质 21.08 g·kg⁻¹,全 N 1.54 g·kg⁻¹,全 P 0.42 g·kg⁻¹,全 K 10.8 g·kg⁻¹,碱解 N 120.16 mg·kg⁻¹,有效 P 31.22 mg·kg⁻¹,速效 K 165.58 mg·kg⁻¹,二乙基三胺五乙酸(DTPA)-Cd 0.25 mg·kg⁻¹,总 Cd 含量为 0.75 mg·kg⁻¹。

供试有机物料主要为水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪和水溶性有机肥。有机物料风干后粉碎过10目尼龙筛,备用。有机物料基本性质见表1。

1.2 试验设计

在温室进行盆栽试验,盆栽试验时间为2019年11月20日至2020年4月20日。试验所用塑料盆规格为上直径18 cm、下直径10.2 cm、高11 cm,盆底有2个小孔,并在底部放置托盘,每盆装土1.0 kg,将水稻秸秆(RS)、大豆秸秆(SS)、猪粪(PM)和水溶性有机肥(OF)分别按土质量为1%、3%与供试土壤拌匀后装入塑料盆中,分别记为RS1%、RS3%、SS1%、SS3%、PM1%、PM3%、OF1%和OF3%,以不添加有机物料作为对照(CK),计9个处理,每个处理3次重复,共27盆,在温室静置20 d。选用大小相近、长势一致且带有叶片的健康伴矿景天(*S. plumbizincicola*)枝条进行扦插,每盆3株,于2019年12月10日移栽。在伴矿景天生长过程中,定期浇水使盆中土壤含水率维持在田间持水量的70%左右。

1.3 样品采集与处理

2020年4月20日收获伴矿景天并采集土壤样品。伴矿景天收获后分地上部和根部,用自来水冲洗干净,再用去离子水反复冲洗,吸水纸擦干,放入烘箱105℃杀青30 min,65℃烘干至恒质量,测定干物质质量,再用玛瑙研钵磨碎,过60目尼龙筛备用;土壤样品经自然风干后,磨碎,分别过10、60、100目尼龙筛备用。

1.4 测定指标及方法

有机物料pH值采用pHs-3C雷兹酸度计测定,物水比为1:10;有机C含量测定采用重铬酸钾容量-外

加热法测定;有机物料用硫酸-过氧化氢消煮法消煮后,全N含量采用凯氏定氮法测定,全K含量采用火焰光度法测定,全P含量采用钒钼黄比色法测定^[22]。

土壤pH用pHs-3C雷兹酸度计测定,土水比为1:2.5;土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热法测定;土壤碱解N采用碱解扩散法测定;土壤有效P采用钼锑抗比色法测定;土壤速效K采用乙酸铵提取法测定。上述指标具体测定步骤参照《土壤农化分析》^[23]。

土壤有效态Cd采用DTPA浸提法测定^[24],土壤和植物重金属含量测定采用美国EPA标准方法(US EPA3051a)消解,伴矿景天植株重金属含量用HNO₃(10 mL)消解,土壤重金属全量用HNO₃:HCl(体积比3:1)混酸消解,仪器为微波消解仪(CEM MAR S6, Matthews, NC, USA)。消化液和浸提液中的Cd含量用原子吸收光谱仪(Pin AAcle 900T, Perkin Elmer, USA)进行测定。样品测试过程中,通过空白试验和国家标准物质(土壤:GBW07406;植物:GBW07603)进行质量控制。

1.5 数据分析

土壤Cd去除率=[修复前土壤Cd全量(mg·kg⁻¹)-修复后土壤Cd全量(mg·kg⁻¹)/修复前土壤Cd全量(mg·kg⁻¹)×100%

采用Excel 2016和Origin 2017进行数据处理和作图,使用SPSS 20.0对数据进行方差分析和相关性分析,Duncan多重比较法检验差异显著性。

2 结果与分析

2.1 有机物料对土壤理化性质的影响

不同有机物料对土壤理化性质的影响见表2。与CK相比,施用有机物料提高了土壤pH,除SS3%和OF1%处理外,其他处理均达到显著水平($P<0.05$),其中PM3%处理土壤pH最高,较CK升高了0.84个单位。有机物料均可提高土壤有机质含量,与CK相比,RS3%、SS3%、PM1%、PM3%处理的土壤有机质含量显著增加($P<0.05$),分别增加了20.28%、9.22%、

表1 供试有机物料基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of organic materials used in the experiment

有机物料 Organic materials	pH	全 C Total C/%	全 N Total N/%	全 P Total P/%	全 K Total K/%	全 Cd Total Cd/(mg·kg ⁻¹)
水稻秸秆 Rice straw	7.28	70.48	1.00	0.16	4.16	0.15
大豆秸秆 Soybean straw	7.52	65.12	0.64	0.19	0.93	0.18
猪粪 Pig manure	8.07	62.65	3.33	5.04	2.17	0.33
水溶性有机肥 Dissolved organic fertilizer	6.71	35.78	4.48	0.27	10.5	0.15

13.36%、28.57%。

与CK相比,有机物料处理还不同程度地提高了土壤速效养分含量。SS3%、PM3%、OF3%处理土壤碱解N含量达显著差异水平($P<0.05$),含量分别增加了17.36%、22.31%、11.57%,其他处理差异不显著。有机物料处理土壤有效P含量增加了3.42%~28.77%。施用有机物料还提高了土壤速效K含量,OF3%处理土壤速效钾含量最高,可达 $178\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.2 有机物料对伴矿景天生物量和Cd含量的影响

不同有机物料对伴矿景天地上部和根部生物量(以干质量计)的影响如图1所示。与CK相比,施用有机物料伴矿景天地上部生物量增加了1.08%~40.69%,RS3%、PM3%、OF3%处理可显著增加伴矿景天地上部生物量($P<0.05$),表明水稻秸秆、猪粪和水溶性有机肥的添加能显著促进伴矿景天的生长。不同有机物料处理下的伴矿景天根部生物量也有不同

程度增加,RS3%处理最高可达 $0.37\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,说明有机物料对伴矿景天根系生长也具有强化作用。

伴矿景天地上部和根部Cd含量因有机物料的种类和用量不同具有一定差异性(图2)。与CK相比,PM1%和PM3%处理伴矿景天地上部Cd含量下降,但无显著差异;其他处理伴矿景天地上部Cd含量有不同程度增加,增幅为10.02%~64.91%。就根部而言,与CK相比,RS3%、SS3%、OF1%和OF3%处理显著提高了伴矿景天根部Cd含量($P<0.05$),而PM1%和PM3%处理根部Cd含量有所降低。总体而言,施用水溶性有机肥对伴矿景天地上部和根部Cd含量的增加效果最好。

2.3 有机物料对伴矿景天Cd积累量的影响

4种有机物料不同程度提高了伴矿景天对污染土壤Cd的积累量(表3)。不同处理下,伴矿景天地上部和根部的Cd积累量占整株积累量的百分比分别为

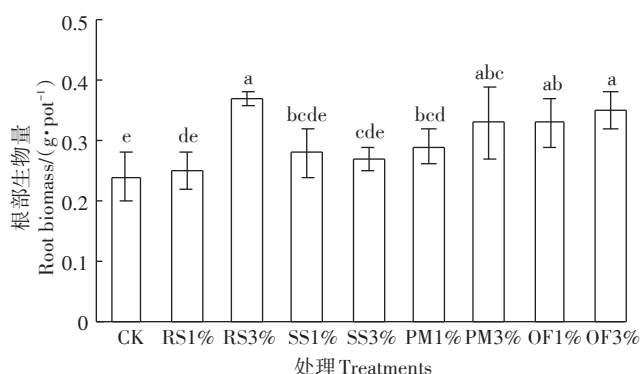
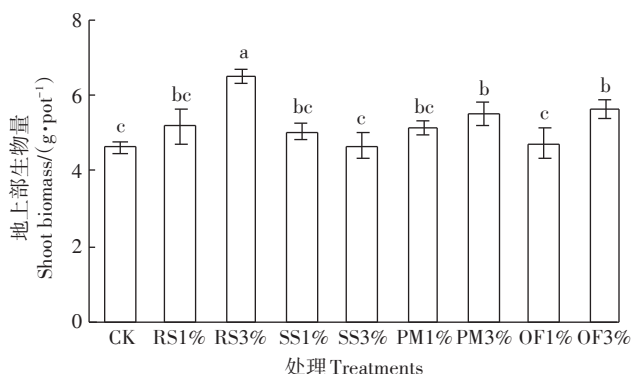
表2 有机物料对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of organic materials on physicochemical properties of soil

处理 Treatments	pH	有机质 Organic matter/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	碱解N Alkali-hydrolyzable N/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效P Available P/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效K Available K/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	4.78±0.08d	21.7±0.5d	121±5d	29.2±0.4e	149±3c
RS1%	4.94±0.07c	23.0±0.9cd	128±8cd	30.8±1.3de	161±7b
RS3%	5.22±0.17b	26.1±0.6b	132±10bcd	32.9±1.5c	175±6a
SS1%	4.98±0.61c	23.1±1.4cd	124±6cd	30.2±1.5e	151±8bc
SS3%	4.91±0.10cd	23.7±0.6c	142±4ab	32.3±0.5cd	158±2bc
PM1%	5.33±0.08b	24.6±1.1bc	131±2bcd	35.0±0.6b	153±6bc
PM3%	5.62±0.07a	27.9±1.2a	148±6a	37.6±0.9a	171±5a
OF1%	4.84±0.04cd	22.9±0.7cd	128±3cd	33.6±0.9bc	173±5a
OF3%	4.95±0.04c	23.4±0.9cd	135±7bc	35.0±0.79b	178±7a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same below.



图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). The same below

图1 有机物料对伴矿景天生物量的影响

Figure 1 Effects of organic materials on biomass of *S. plumbizincicola*

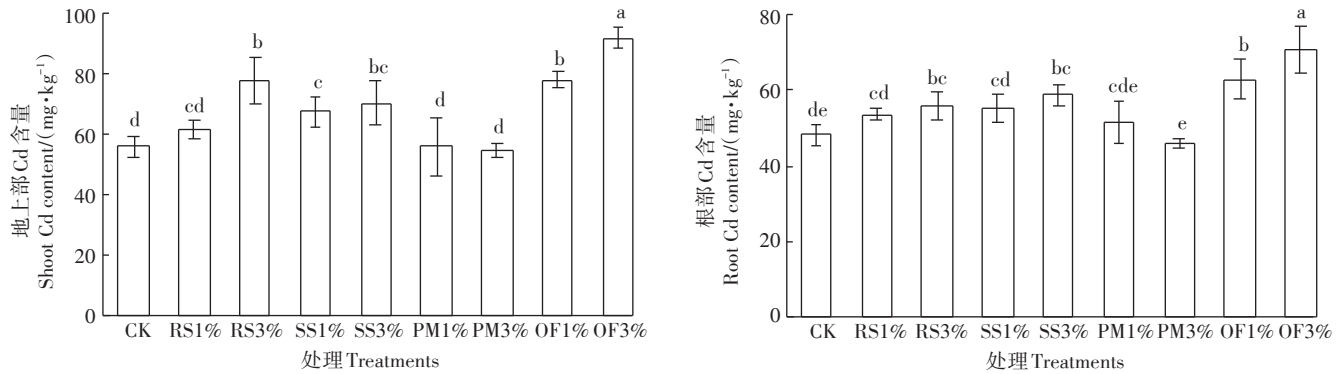


图2 有机物料对伴矿景天Cd含量的影响

Figure 2 Effects of organic materials on Cd content of *S. plumbizincicola*

94.62%~96.37%和3.56%~5.37%。与CK相比,不同有机物料处理增加了伴矿景天Cd总积累量,增幅为11.67%~95.57%。伴矿景天Cd积累量受有机物料种类的影响,施用水稻秸秆和水溶性有机肥伴矿景天对Cd的积累效果较好,其中RS3%和OF3%处理Cd总积累量分别可达527 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 和542 $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ 。此外,比较同一种有机物料用量之间的效果可以发现,高用量(3%)条件下伴矿景天Cd总积累量都比低用量(1%)高,这说明伴矿景天Cd积累量还受有机物料用量的影响。

2.4 有机物料对土壤Cd全量和有效态Cd含量的影响

有机物料的施用对土壤DTPA-Cd含量产生了不同程度的影响(表4)。与CK相比,PM1%和PM3%处理土壤DTPA-Cd含量分别降低了6.25%和12.5%,但无显著差异。其他处理土壤DTPA-Cd含量有不同程度增高,且含量随施用量的增加而增高,其中OF3%处理效果最好,较CK增高了50.0% ($P<0.05$)。由此

可见,土壤DTPA-Cd含量的变化因有机物料种类和用量而异。

利用伴矿景天进行植物修复过程中,施用有机物料促进了污染土壤中Cd的去除,且不同有机物料种类及用量对土壤Cd去除率表现出一定差异(表4)。由表4可知,伴矿景天修复后土壤Cd全量较修复前降低了0.21~0.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。CK处理土壤Cd去除率为27.6%,有机物料处理土壤Cd去除率可达29.8%~50.7%,其中水稻秸秆和水溶性有机肥处理土壤Cd的去除效果较好。可见,施用有机物料对伴矿景天修复酸性Cd污染农田土壤具有强化作用。

2.5 有机物料及其施用量对伴矿景天修复效应分析

如表5所示,有机物料类型对土壤pH、DTPA-Cd含量、Cd去除率和伴矿景天地上部生物量、根部Cd含量、地上部Cd含量和Cd总积累量有显著影响;有机物料施用量对土壤pH、DTPA-Cd含量、Cd去除率和伴矿景天根部生物量、地上部生物量、地上部Cd含量和Cd总积累量有显著影响。表明土壤Cd的活性

表3 有机物料对伴矿景天Cd积累量的影响($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

Table 3 Effects of organic materials on Cd accumulation in *S. plumbizincicola*($\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

处理 Treatments	Cd总积累量 Total accumulation of Cd	根部Cd积累量 Root Cd accumulation	地上部Cd积累量 Shoot Cd accumulation
CK	270±24d	11.5±1.1e	258±25d
RS1%	331±25bcd	11.8±1.5de	319±24bcd
RS3%	527±59a	20.9±0.9b	506±58a
SS1%	356±39bc	15.2±1.4cd	341±39bc
SS3%	344±30bcd	15.8±0.4c	328±30bcd
PM1%	301±48cd	14.8±2.3cde	286±46cd
PM3%	316±30cd	15.0±2.2cde	301±28bcd
OF1%	391±46b	21.0±3.7b	370±43b
OF3%	542±43a	24.8±1.6a	517±45a

表4 修复后土壤Cd全量和有效态Cd含量

Table 4 Soil total Cd content and available Cd content after phytoremediation

处理 Treatments	修复后土壤Cd全量 Total Cd/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd去除率 Cd removal rate/%	DTPA-Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	0.54±0.04a	27.6±3.4e	0.16±0.02bcd
RS1%	0.45±0.08bc	39.6±10.2bc	0.18±0.01bc
RS3%	0.38±0.04d	49.3±4.8a	0.22±0.02a
SS1%	0.48±0.02ab	35.6±2.8cde	0.16±0.01bcd
SS3%	0.43±0.05bcd	43.1±6.6abc	0.18±0.01b
PM1%	0.53±0.03a	29.8±3.4de	0.15±0.02cd
PM3%	0.47±0.02abc	37.3±2.3bcd	0.14±0.02d
OF1%	0.41±0.03cd	45.3±3.5ab	0.22±0.02a
OF3%	0.37±0.02d	50.7±2.3a	0.24±0.01a

表5 多因素方差分析中F值的显著性

Table 5 Significance of F value in two-way ANOVA analysis of variance

效应 Effect	pH	DTPA-Cd	根部生物量 Root biomass	地上部生物量 Shoot biomass	根部Cd含量 Root Cd	地上部Cd含量 Shoot Cd	Cd总积累量 Total accumulation of Cd	Cd去除率 Cd removal rate
有机物料 Organic materials	***	***	—	*	***	***	**	***
施用量 Application rate	**	*	*	*	—	*	*	***

注:—表示不显著;*** $P<0.001$; ** $P<0.01$; * $P<0.05$ 。

Note:— indicates not significant; *** significant at $P<0.001$; ** significant at $P<0.01$; * significant at $P<0.05$.

和伴矿景天修复效率受到有机物料类型和施用量共同影响。

2.6 土壤和伴矿景天主要指标相关性分析

表6为土壤和伴矿景天主要指标相关性分析。结果表明,土壤DTPA-Cd含量与速效K呈极显著正相关关系($P<0.01$)。伴矿景天根部Cd含量与土壤DTPA-Cd含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与土壤速效K呈显著正相关关系($P<0.05$),与pH呈显著负相关关系($P<0.05$)。伴矿景天地上部Cd含量与土壤DTPA-Cd含量和速效K呈极显著正相关关系($P<0.01$),与pH呈显著负相关关系($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 有机物料对土壤Cd有效性的影响

土壤Cd有效性是影响伴矿景天修复效率的重要

因素,有机物料可通过改变土壤Cd化学形态来影响超积累植物对土壤Cd的吸收。然而,有机物料对土壤Cd赋存形态的影响受其种类、用量、土壤类型和污染水平等多因素的影响,贾乐等^[25]和王腾飞等^[26]的研究发现,土壤中的秸秆和猪粪分解时,可释放大量的可溶性有机质(DOM),对土壤中Cd有较好的活化作用,从而提高土壤中有效态Cd含量;而Xu等^[19]研究结果表明,水稻秸秆和小麦秸秆进入土壤可以形成稳定的络合物,使土壤有效态Cd含量降低。本研究的结果表明,施用猪粪处理的土壤有效态Cd含量有所下降,其原因可能是猪粪施入土壤后分解产生大分子腐植酸,腐植酸与 Cd^{2+} 形成稳定性较高的络合物,进而使重金属Cd钝化,降低了土壤DTPA-Cd含量;而施用水稻秸秆、大豆秸秆和水溶性有机肥虽然提高了pH,但也不同程度提高了土壤DTPA-Cd含量,其中

表6 土壤和伴矿景天主要指标的相关性系数

Table 6 Correlation coefficients of the main indexes of soil and *Sedum plumbizincicola*

	pH	DTPA-Cd	有机质 Organic matter	碱解N Alkali-hydrolysable N	有效P Available P	速效K Available K	根部生物量 Root biomass	地上部生物量 Shoot biomass	根部Cd含量 Root Cd	地上部Cd含量 Shoot Cd	Cd总积累量 Total accumulation of Cd	Cd去除率 Cd removal rate
pH	1	-0.370	0.820**	0.552**	0.668**	0.225	0.339	0.418*	-0.486*	-0.384*	-0.093	-0.109
DTPA-Cd		1	-0.163	-0.020	0.055	0.613**	0.441*	0.314	0.723**	0.819**	0.763**	0.707**
有机质 Organic matter			1	0.584**	0.684**	0.434*	0.401*	0.488**	-0.206	-0.100	0.148	0.169
碱解N Alkali-hydrolysable N				1	0.654**	0.392*	0.294	0.126	-0.057	-0.009	0.032	0.159
有效P Available P					1	0.533**	0.542**	0.329	0.093	0.131	0.248	0.264
速效K Available K						1	0.605**	0.441*	0.461*	0.575**	0.631**	0.548**
根部生物量 Root biomass							1	0.619**	0.296	0.485*	0.664**	0.548**
地上部生物量 Shoot biomass								1	0.065	0.283	0.700**	0.409*
根部Cd含量 Root Cd									1	0.918**	0.708**	0.637**
地上部Cd含量 Shoot Cd										1	0.880**	0.766**
Cd总积累量 Total accumulation of Cd											1	0.762**
去除率 Removal rate												1

注:*表示不同处理间显著相关($P<0.05$),**表示不同处理间极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicates significant at $P<0.05$, ** indicates significant at $P<0.01$.

RS3%、OF1%和OF3%处理达到显著水平($P<0.05$),原因可能是水稻秸秆、大豆秸秆和水溶性有机肥能将大量DOM带入土壤中,而DOM可与土壤中 Cd^{2+} 形成更多的可溶性络合物(Cd-DOM络合物),进而提高了土壤Cd的生物有效性,这与陈同斌等^[27]和段明梦等^[28]的研究结果一致。有研究表明,DOM还能够为土壤微生物的生命活动提供丰富的碳氮源与多种矿质营养,调控土壤中与Cd氧化、还原等功能相关的微生物活性,进而影响土壤Cd的有效性^[29-30]。Li等^[31]研究还表明,伴矿景天根系分泌物对土壤重金属也具有活化作用,可提高土壤Cd有效性。此外,伴矿景天对土壤Cd的吸收也会消耗土壤有效态Cd含量^[32]。因此,在伴矿景天修复过程中,有机物料对土壤Cd有效性的影响过程比较复杂。

3.2 伴矿景天修复效率

生物量和Cd含量是影响伴矿景天修复效率的关键因素,通过强化措施提高两者之一或者同时提高两者都有利于伴矿景天修复效率的提高。本研究中,施用4种有机物料不同程度地增加了伴矿景天地上部和根部生物量(图1),原因可能是有机物料的施入不同程度提高了土壤有机质和有效态N、P、K含量,促进了伴矿景天的生长,其增加效果为:水稻秸秆>水溶性有机肥>猪粪>大豆秸秆。猪粪处理伴矿景天Cd含量无显著变化;而施用水稻秸秆、大豆秸秆和水溶性有机肥促进了伴矿景天对土壤Cd的吸收,究其原因可能是增加了土壤Cd的活性。本研究相关性分析结果表明,伴矿景天地上部和根部Cd含量与土壤DTPA-Cd含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),也证明了这一点。此外,Zhou等^[33]的研究结果也显示,添加水稻秸秆处理下伴矿景天地上部Cd含量显著增加,污染土壤上第一季伴矿景天Cd吸取量提高了14.3%~20.7%,原因是水稻秸秆施入土壤后提高了土壤Cd有效性,促进了伴矿景天对土壤Cd的吸收,类似地,有研究表明三叶草施入土壤后显著提高了伴矿景天Cd含量,表明不同种类有机物料对伴矿景天Cd吸收效果的影响不同^[20]。所有处理中,OF3%处理伴矿景天地上部和根部的Cd含量最高,分别较CK增加了64.91%和45.78%,究其原因主要是其对土壤Cd的活化效果最好,OF3%处理土壤DTPA-Cd含量可达 $0.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CK处理($0.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。此外,Fan等^[34]研究结果表明,使用水稻秸秆联合伴矿景天修复后土壤Cd去除率可达31.8%;本试验结果显示,单纯使用伴矿景天(CK)修复土壤Cd去除率为

27.6%,有机物料联合伴矿景天修复后土壤Cd去除率可达29.8%~50.7%,说明有机物料在提高伴矿景天对Cd污染酸性土壤的修复效率方面发挥了重要作用。

试验条件下,不同有机物料处理伴矿景天对Cd污染土壤的修复效率有所不同,比较同一有机物料不同用量之间的效果差异可以发现,3%用量的效果优于1%用量,这说明有机物料对伴矿景天修复Cd污染农田土壤的效果不仅因有机物料种类而异,还与有机物料的施用量有关。陈绩等^[35]研究发现,施用黄腐酸钾促进了修复0~4个月的东南景天对Cd的吸收积累,Cd积累量较CK提高了265.44%,而修复4~8个月东南景天Cd积累量较CK下降,由此可见,提高重金属污染土壤的植物修复效果,还需要考虑修复周期的影响。总体而言,施用水稻秸秆、大豆秸秆、猪粪和水溶性有机肥对Cd污染酸性农田土壤的伴矿景天修复都具有一定促进作用,水稻秸秆和水溶性有机肥的效果较好。因此,在利用伴矿景天修复Cd污染酸性农田土壤时,可考虑水稻秸秆还田和增施水溶性有机肥进行辅助强化修复,从而达到提高伴矿景天修复效率的目的,但有机物料长期修复效果以及大田试验效果还有待进一步研究。

4 结论

(1)试验条件下,Cd污染酸性农田土壤中施用4种有机物料使土壤pH值、有机质、碱解N、有效P和速效K含量有不同程度增加,土壤理化性质有所改善。

(2)4种有机物料促进了伴矿景天生长,提高了伴矿景天地上部和根部生物量,OF3%处理效果最好;施用RS、SS和OF还可提高土壤DTPA-Cd含量和伴矿景天Cd含量,OF3%处理效果最好。

(3)有机物料提高了伴矿景天修复效率,其中RS3%和OF3%处理对土壤Cd的去除效果最佳,因此,在利用伴矿景天修复Cd污染酸性土壤过程中,可考虑水稻秸秆还田和合理增施水溶性有机肥来提升修复效率。

参考文献:

- [1] Sidhu G P S, Singh H P, Batish D R, et al. Tolerance and hyperaccumulation of cadmium by a wild, unpalatable herb *Coronopus didymus* (L.) Sm. (Brassicaceae) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 135: 209-215.
- [2] Rodrigues S M, Cruz N, Coelho C, et al. Risk assessment for Cd, Cu, Pb and Zn in urban soils: Chemical availability as the central concept [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183(4): 234-242.
- [3] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, et al. Contamination features and health

- risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 513:143-153.
- [4] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL][2017-02-15]. http://www.zhb.gov.cn/gkm/L/hbb/qt/201404/t20140417_270670.html.
- Ministry of Environmental Protection. A communique of national soil pollution investigation reported by Ministry of Environmental Protection and Land and Resources[EB/OL][2017-02-15]. http://www.zhb.gov.cn/gkm/L/hbb/qt/201404/t20140417_270670.html.
- [5] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9):1689-1692.
- CHEN Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, et al. Analysis of the Report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9):1689-1692.
- [6] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?[J]. *Plant Science*, 2011, 180:169-181.
- [7] 张继舟, 王宏韬, 黄磊, 等. 重金属污染土壤的植物修复技术研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14):134-139.
- ZHANG Ji-zhou, WANG Hong-tao, HUANG Lei, et al. Research on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14):134-139.
- [8] 吴龙华, 李娜, 毕德, 等. 锌镉复合污染土壤的植物修复方法: 200710020380.5[P]. 2007-08-15.
- WU Long-hua, LI Na, BI De, et al. Phytoremediation method for zinc-cadmium complex contaminated soil:200710020380.5[P]. 2007-08-15.
- [9] Wu L H, Liu Y J, Zhou S B, et al. *Sedum plumbizincicola*: A new species from Zhejiang Province, China[J]. *Plant Systematics and Evolution*, 2013, 299(3):487-489.
- [10] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 32(6):101-106.
- LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, YAN Xiu-lan, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 32(6):101-106.
- [11] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11):3422-3426.
- LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3422-3426.
- [12] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4):572-576.
- CUI Li-qiang, WU Long-hua, LI Na, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2009, 41(4):572-576.
- [13] 李娜, 唐明灯, 崔立强, 等. 光照强度对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2):370-373.
- LI Na, TANG Ming-deng, CUI Li-qiang, et al. Effects of light intensity on plant growth and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2):370-373.
- [14] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及锌镉吸收性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):221-225.
- SHEN Li-bo, WU Long-hua, HAN Xiao-ri, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2):221-225.
- [15] 马文亭, 滕应, 凌婉婷, 等. 里氏木霉 FS10-C 对伴矿景天吸取修复镉污染土壤的强化作用[J]. 土壤, 2012, 44(6):991-995.
- MA Wen-ting, TENG Ying, LING Wan-ting, et al. Enhancing remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium contaminated soils by *Trichoderma reesei* FS10-C[J]. *Soils*, 2012, 44(6):991-995.
- [16] 柏佳, 谭长银, 曹雪莹, 等. 3种有机酸对伴矿景天修复效率及土壤微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2):319-324.
- BAI Jia, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effect of three organic acids on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* and soil microbial quantity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2):319-324.
- [17] 王意银, 张焕朝, 郝秀珍, 等. 有机物料在重金属污染农田土壤修复中的应用研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5):1275-1280.
- WANG Yi-kun, ZHANG Huan-chao, HAO Xiu-zhen, et al. A review on application of organic materials to the remediation of heavy metal contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5):1275-1280.
- [18] 黎秋君, 黎大荣, 王英辉, 等. 3种有机物料对土壤理化性质和重金属有效态的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6):183-185.
- LI Qiu-jun, LI Da-rong, WANG Ying-hui, et al. Effects of three kinds of organic materials on physicochemical properties and available heavy metals in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(6):183-185.
- [19] Xu P, Sun C X, Ye X Z, et al. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 132:94-100.
- [20] Wu L H, Li Z, Akahane I, et al. Effects of organic amendments on Cd, Zn and Cu bioavailability in soil with repeated phytoremediation by *Sedum plumbizincicola*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14:1024-1038.
- [21] Wu L H, Zhou J W, Zhou T, et al. Estimating cadmium availability to the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in a wide range of soil types using a piecewise function[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638:1342-1350.
- [22] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY 525—2012[S]. 北京: 中国农业出版社出版, 2012.
- Ministry of Agriculture of PRC. Organic fertilizer: NY 525—2012[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [24] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5):942-951.
- HE Qi-hui, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of fertilizer on the availability of heavy metals in soil and its accumulation in rice seedling[J]. *Research of Environmental Science*, 2018, 31(5):

- 942-951.
- [25] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992-1998.
- JIA Le, ZHU Jun-yuan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1992-1998.
- [26] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 257-263.
- WANG Teng-fei, TAN Chang-yin, CAO Xue-ying, et al. Effects of long-term fertilization on the accumulation and availability of heavy metals in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 257-263.
- [27] 陈同斌, 陈志军. 水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 183-186.
- CHEN Tong-bin, CHEN Zhi-jun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2): 183-186.
- [28] 段明梦, 王帅, 黄道友, 等. 易降解有机物及其施加方式对高粱吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1000-1007.
- DUAN Ming-meng, WANG Shuai, HUANG Dao-you, et al. Effect of biodegradable organic materials and application regimes on cadmium absorption in *Sorghum bicolor* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1000-1007.
- [29] 王孜楠, 李柱, 刘鸿雁, 等. 不同类型污染土壤中赤子爱胜蚓对伴矿景天重金属吸收的影响初报[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 549-559.
- WANG Zi-nan, LI Zhu, LIU Hong-yan, et al. Effect of *Eisenia foetida* on the metal uptake by *Sedum plumbizincicola* in different types of contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3): 549-559.
- [30] Rees F, Sterckeman T, Morel J L. Root development of non-accumulating and hyperaccumulating plants in metal-contaminated soils amended with biochar[J]. *Chemosphere*, 2016, 142: 48-55.
- [31] Li Z, Wu L H, Hu P J, et al. Repeated phytoextraction of four metal-contaminated soils using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189: 176-183.
- [32] Li Z, Jia M Y, Wu L H, et al. Changes in metal availability, desorption kinetics and speciation in contaminated soils during repeated phytoextraction with the Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 209: 123-131.
- [33] Zhou T, Wu L H, Christie P, et al. The efficiency of Cd phytoextraction by *S. plumbizincicola* increased with the addition of rice straw to polluted soils: The role of particulate organic matter[J]. *Plant Soil*, 2018, 429(1/2): 321-333.
- [34] Fan Y Q, Li Z, Zhou T, et al. Phytoextraction potential of soils highly polluted with cadmium using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21: 733-741.
- [35] 陈绩, 赵科理, 柳丹, 等. 有机肥料联合东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(11): 1346-1351.
- CHEN Ji, ZHAO Ke-li, LIU Dan, et al. Remediation of organic fertilizer combined with *Sedum alfredii* for heavy metals contaminated soil [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11): 1346-1351.